干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.01.08

京津冀夏季强降水下冰云宏微观特征①

郑 倩[1]， 郑有飞[1,2,3]， 王立稳[1]， 李 特[1]， 林 彤[1]， 杜傢义[4]

（1 南京信息工程大学大气物理学院，江苏 南京 210044； 2 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室，江苏 南京 210044； 3 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心，江苏 南京 210044； 4 南京信息工程大学环境科学与工程学院，江苏 南京 210044）

摘 要：根据 Aqua MODIS 2 级云产品和 Cloudsat 的 2 级产品资料，结合降水数据和 MODIS L1B 级辐射率数据，对发生在京津冀地区夏季的三次强降水过程中冰云的宏微观物理量的特征进行分析，并探究这些物理量和降水强度的关系。结果表明：在水平分布中，强降水过程中降水强度高值区内云相为冰云，冰云云顶高度在 8～17 km，冰云粒子有效半径、冰云光学厚度、冰水路径分别最高可达 60 μm、150、5 000 $g\cdot m^{-2}$；冰云光学厚度、冰水路径、冰云云顶高度随降水强度增大而增大。在垂直分布中，冰云主要分布在 3.5 km 以上，发生强降水站点的冰云为深对流云，冰云粒子有效半径、冰水含量、冰云粒子数浓度分别最高可达 150 μm、3 000 $mg\cdot m^{-3}$、500 L^{-1}；冰云粒子有效半径高值区存在于云层中下部，且随高度上升而减小，冰云粒子数浓度高值区存在于云层中上部，且随高度上升而增加，冰水含量高值区则存在于云层中部；冰云粒子有效半径、冰水含量、冰云粒子数浓度在 9 km 以上随降水强度增大而增大。

关 键 词： 京津冀；夏季；冰云；强降水；宏微观特征

文章编号： 1000-6060(2019)01-0067-10(0067～0076)

强降水是京津冀夏季的主要天气之一[1]。京津冀是我国水资源比较匮乏的地区之一[2]，强降水的发生一方面可以增加水资源，缓解旱情，但是另一方面又会造成洪涝灾害和引起山体滑坡等灾害发生。以 2012 年北京“7·21”暴雨为例，这次强降水造成房屋倒塌 10 660 间，160.2 万人受灾，经济损失 116.4 亿元[3-4]。

长期以来，国内外的学者对强降水做了大量的研究[4-6]，但大多从天气动力学和气候学角度进行分析。除了受动力、热力条件影响外，降水的形成和发展受云内部微物理过程的影响，云微物理因素的微小变化都能影响云的结构和降水[7]。同时，云的结构特征和降水机制、降水效率等紧密相关[8]。此外，云相态对云的发生发展及降水的产生具有重要作用，是水汽输送、上升运动之外的微物理条件，已有研究表明，云相态的变化伴随的热力学过程将直接影响到各种尺度天气系统的形成和演变[9-10]，且冰相态的云与降水的密切关系[11]。其中，冰相粒子的凝华增长对降水的贡献率超过 35%，冰相粒子加强时地面降水增大，冰相粒子减弱时降水减少[12-13]。因此分析冰云的宏微观物理量的特征对于研究云和降水的形成和发展具有重要的意义。

在目前冰云研究中，卫星观测是最重要的手段之一[14-15]。由于极轨卫星是太阳同步轨，轨道预告、接收和资料定位都很方便，有利于资料的处理和使用[16]。其中 MODIS 光谱覆盖范围广，空间分辨率高，能得到更多的云特征，是目前应用最为广泛的被动极轨卫星传感器[17]。并且 CloudSat 是具有高空间分辨率的主动极轨卫星，能探测云的垂直结构。此前国内外的学者利用 MODIS 和 CloudSat 这两种极轨卫星资料对冰云做了许多研究。如在水平分布特征方面，TANG 和 CHEN[18] 利用 MODIS 研究了与亚洲夏季风有关的云的特征，发现印度季风区存在大量冰云。MEYER 等[19] 利用 MODIS 发现在热带

① **收稿日期：**2018-08-19； **修订日期：**2018-11-01
基金项目：国家自然科学基金项目(41590873)
作者简介：郑倩(1994-)，女，硕士研究生，研究方向为大气物理与大气环境. E-mail:770586517qq@sina.cn
通讯作者：郑有飞，男，博士，教授，博士生导师，主要从事气候变化与环境气象方面的研究. E-mail:zhengyf@nuist.edu.cn

地区观测到的冰云概率相当高,且陆地上出现的频率比海洋的频率更高。杨冰韵等[20]和张华等[21]分别利用CloudSat卫星资料得到了全球和东亚地区的冰水含量、冰水路径和冰云有效半径的分布和季节变化特征。另一方面,学者们也研究了云的垂直分布特征。如GRENIER等[22]利用CloudSat资料研究了极地薄冰云中云参数的垂直分布规律。HAM等[23]利用CloudSat和CALIPSO检测冰云层的垂直剖面形状,发现随着冰云光学厚度的增加,冰水含量中的最大值向云底移动。赵姝慧[24]、陈勇航等[25]、邓军英等[26]分别利用CloudSat分析了台风发展过程中和新疆地区强降雨过程中冰云粒子的垂直结构。上述研究表明国内外学者利用MODIS和CloudSat这两种卫星资料已经取得了许多进展,同时为本文提供了依据,但是对于强降水下冰云的宏微观的分布特征还很少。

因此,本文利用Aqua MODIS和CloudSat极轨卫星资料分析京津冀地区夏季三次强降水过程中冰云宏微观物理量的水平和垂直分布特征,探究其与降水强度的变化规律,为人工影响天气、降水预报和灾害性天气分析做出贡献。

1 研究区概况和方法

本文的研究区域是京津冀地区,位于113°04′~119°53′E、36°01′~42°37′N。选取的资料包括2013—2016年的夏季京津冀地区的中国自动站与CMOPRH降水产品融合的逐时降水量网格数据集资料,2013年7月1日、2014年7月4日、2015年8月1日Aqua卫星的MODIS每日合成产品MYD06_L2、MODIS L1B级辐射率数据MYD02HKM和MYD02QKM以及CloudSat卫星的2B-CWC-RO和2B-CLDCLASS资料。降水资料来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/),时间分辨率为1 h,空间分辨率为0.1°×0.1°。Aqua卫星和和CloudSat卫星每天上午5:00~6:00(世界时,下同)或下午18:00~17:00经过京津冀上空。其中,MYD06_L2资料的云相和云顶高度空间分辨率为5 km×5 km,而光学厚度,粒子等效半径,云水路径空间的分辨率为1 km×1 km。Cloudsat的2B-CWC-RO和2B-CLDCLASS资料的分辨率为2.5 km×1.4 km(沿轨×横轨),垂直方向上包含125层,每层240 m。

按中国气象局12 h降水量分级标准,小雨为小于4.9 mm,中雨为5.0~14.9 mm,大雨为15.0~29.9 mm,暴雨为30~69.9 mm,大暴雨为70~139.9 mm,特大暴雨为140 mm及以上。去除缺测值,首先根据2012—2016年夏季中国自动站与CMOPRH降水产品融合的逐时降水量网格数据集资料筛选出京津冀地区12 h时内达到大雨及以上的日期及经纬度,再参照有强降水的日期和经纬度筛选出同时段内有Aqua MODIS和CloudSat轨道过境的个例作为研究对象。通过筛选,最终以2013年7月1日、2014年7月4日、2015年8月31日代表经过京津冀地区117.6°E、42.6°N~118.7°E、39.2°N,116.3°E、42.0°N~117.5°E、38.0°N,114.6°E、42.1°N~116.1°E、37.4°N这三条路径的三次强降水过程(表1),两个卫星过境时间相差不超过5 min。

2 结果与分析

2.1 降水概况及云况

据中国气象局12 h降雨量分级标准,Cloudsat轨道在三次强降水过程所经过的站点中,2013年7月1日、2014年7月4日、2015年8月31日的12 h降雨量分别为234.0 mm、30.3 mm和20.7 mm,分别可达特大暴雨、暴雨、大雨。由于卫星经过研究区域时间为5:30左右,本文给出了京津冀三次强降水过程的5:00~6:00时段的小时降水量图(图1)。在该时段内,2013年7月1日整个京津冀范围内降水强度存在三个高值区,Cloudsat经过其中两个高值区,最高可达40 mm·h^{-1}。2014年7月4日整个

表1 三次强降水过程

Tab.1 Three heavy rainfall process

序号	日期	MODIS过境时间	Cloudsat过境时间	Cloudsat轨道强降水站点纬度/°N	强降水站点12 h降雨量/mm
1	2013-07-01	5:27:15~5:28:54	5:30:41~5:31:47	38.2~38.9	234.0
2	2014-07-04	5:27:27~5:28:56	5:30:44~5:31:50	39.2	30.3
3	2015-08-31	5:33:02~5:34:42	5:34:50~5:36:09	40.7~41	22.7

京津冀地范围内降水强度存在两个高值区,Cloudsat经过其中一个高值区,在天津附近,最高可达18 mm·h^{-1}。2015年8月31日整个京津冀地范围内降水强度存在多个高值区,Cloudsat经过其中一个高值区,在张家口附近,最高可达12 mm·h^{-1}。显然,轨道路径所经区域三次强降水的降水强度为2013年7月1日>2014年7月4日>2015年8月31日。

云是降水的载体和指示物,云的结构特征和特性在降水系统发展过程中起重要的作用[26]。为了更好的研究三次强降水过程下云的结构特征,本文利用MODIS L1B级辐射率数据MYD02HKM和MYD02QKM得到了0.66 μm、0.55 μm、0.47 μm合成波段的Aqua MODIS真彩色合成图(图2)。结合图1,可以看出,三次强降水下降水强度较大的站点的云,颜色较白,色调较亮,相对较厚,而且降水强度越大越明显。这是因为云的发展状况不同是降水量分布不均的直接原因[26]。

2.2　冰云宏微观物理量水平分布情况

2.2.1　云相　云相态是水汽输送、上升运动之外的微物理条件,对于解释天气气候系统发生、发展的物理机制有着十分重要的意义[27]。为了更好的解释三次强降水的发生,本文给出了三次强降水中云相态的水平分布(图3)。结合图1可以看出,三次强降水中的降水强度高值区所对应的云的相态几乎都是冰云,且冰云在水平分布的占比中较大,但冰云所占比例随三次强降水的降水强度大小变化不大。

2.2.2　其他云物理量特征　云顶高度这一宏观参量对云动力和云微物理演化具有重要作用[28],且云和降水的发展演变过程本质上是云中粒子谱的演变过程[29]。图4是中京津冀地区三次强降水过程的4种云物理量水平分布情况。结合图3中云相态的分布,发现就冰云宏微观物理量的水平分布的总体特征而言,冰云云顶高度在8~17 km,冰云粒子有效半径最高可达60 μm,冰云光学厚度在最高可达150,冰水路径在最高可达5 000 g·m^{-2}。

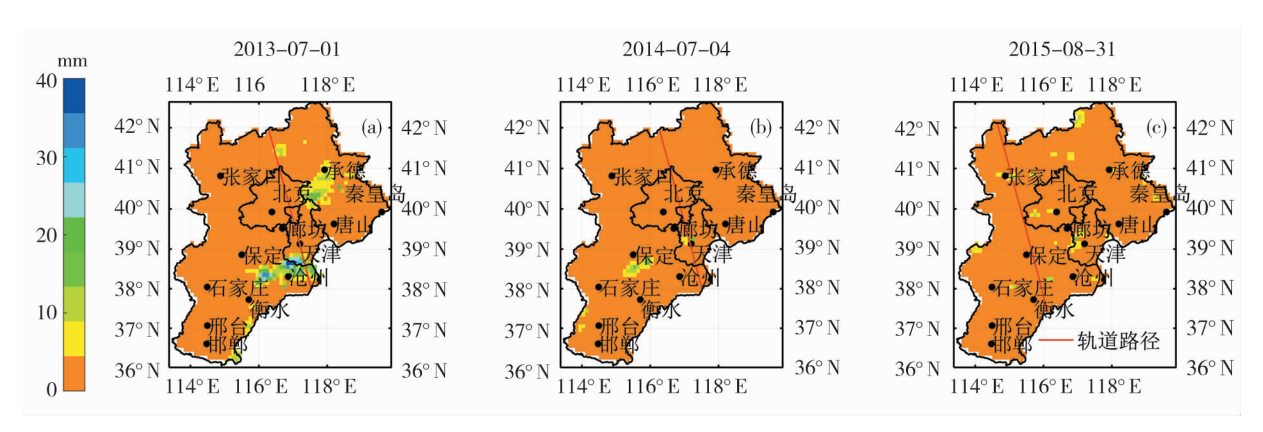


图1　5:00~6:00小时降水量及CloudSat轨道路径分布

Fig. 1　5:00-6:00 hourly precipitation and CloudSat orbit path distribution

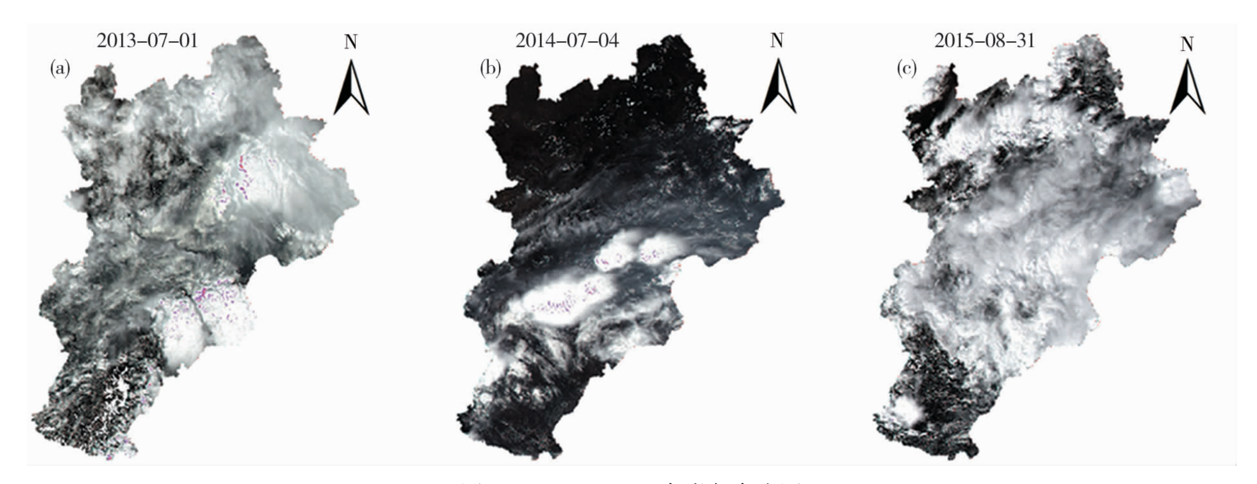


图2　Aqua MODIS真彩色合成图

Fig. 2　Aqua MODIS true color image

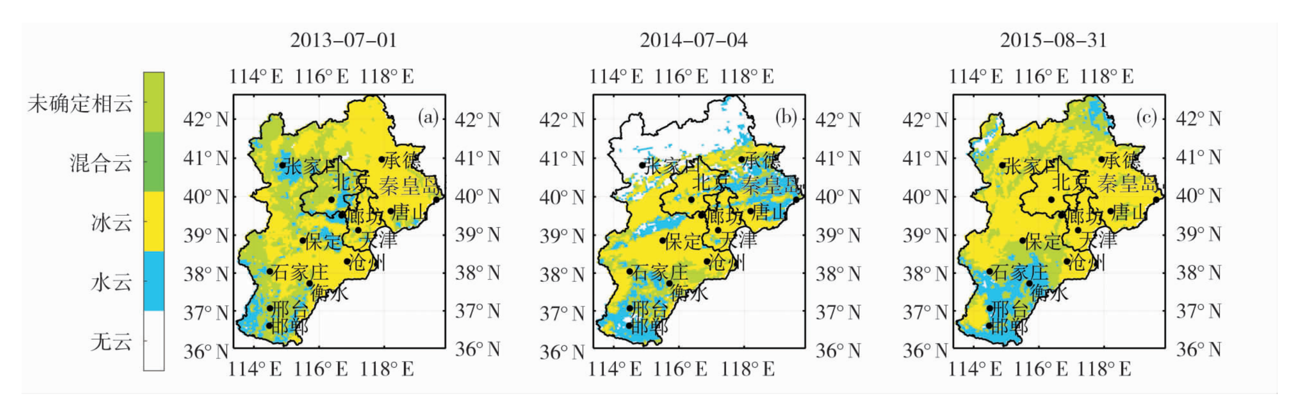


图 3　云相态的水平分布

Fig. 3　Horizontal distribution of cloud phase

图 4　云顶高度、云粒子有效半径、云光学厚度、云水路径的水平分布

Fig. 4　Horizontal distribution of cloud top height, cloud particle effective radius, cloud optical thickness and cloud water path

在 2013 年 7 月 1 日，冰云云顶高度、冰云光学厚度、冰水路径有两个明显的高值区，分别在 116°E

以东,38.5°N 以南以这一区域及 117°E ~ 118.5°E、40°N ~ 41°N 这一区域。对比图 1 可以发现,这两个高值区内的小时降水量明显大于冰云所在区域内其他部分的降水量,均超过 10 mm,其中 116°E 以东,38.5°N 以南以这一区域的降水量超过 20 mm。而这两个高值区内的冰云粒子有效半径则相对较小。同样地,在 2014 年 7 月 4 日和 2015 年 8 月 31 日也发现了类似的状况。这是由于冰质粒有效半径大,下落末速度比较大,容易落到地面,因此降水强度大的地区测得的冰云粒子有效半径相对较小。

2.2.3　*冰云宏微观物理量的水平分布与降水强度关系*　对比图 4 三次强降水过程中这 4 种物理量的的水平分布,显示冰云云顶高度、冰云光学厚度、冰水路径在三次强降水过程中是随降水强度的增大而增大的;冰云粒子有效半径与降水强度则无明显关系。从物理机制上看,这是因为降水强度大的地区蒸发量相对较大,蒸发进入大气的水汽相对较多,冰云中的含水量也相对较大,因此冰水路径也相对较大;影响云光学厚度分布的主要因子是云量,原因是云量大的地方整层云的消光作用强[20],而降水强度大的地区,蒸发加大,使冰云云量增多,致使光学厚度的值变大。一般而言,云顶越高,即云越深厚,此时云底发生降水的概率越大[30]。而冰云粒子有效半径在 20 ~ 40 μm 左右时,地面有降水,而冰云粒子有效半径大于 40 μm 或小于 20 μm 时地面无降水或降水较少。这与周毓荃[8]发现的在层状云降水过程中,云粒子有效半径值与雨强无显著的对应关系,在对流云降水过程中,无降水的样本数随粒子有效半径值增大而减小较为一致。这是因为冰云的粒子有效半径不仅取决于云冰的数量,还取决于温度[31]。

2.3　冰云宏微观物理量垂直分布情况

云的结构特征和降水机制、降水效率等紧密相关[8]。为了了解强降水过程中冰云的垂直结构,本文选取了 CloudSat 经过的路径内有强降水发生的个例来研究。

2.3.1　*云的类型*　从图 5 可知,2013 年 7 月 1 日,该过境区域内云主要分布在 0.5 ~ 17 km,还有少量存在于 23 ~ 25 km 内;2014 年 7 月 4 日、2015 年 8 月 31 日则分别主要在 0.5 ~ 14 km 和 0.5 ~ 13 km。从冰云微观物理量的垂直分布图可知,冰云主要分布在 3.5 km 以上。由此可见,降水强度越大,冰云的厚度和冰云云顶高度越大,这与之前水平分布的分析结果是一致的。结合图 1 中地面的降水强度,可以发现三次强降水中强降水的站点对应云的类型都是深对流云。

2.3.2　*微观物理量特征*　就冰云微观物理量垂直分布(图 6)的总体特征而言,冰云粒子有效半径最高可达 150 μm,冰水含量最高可达 3 000 mg · m^{-3},冰云粒子数浓度最高可达 500 L^{-1}。

2013 年 7 月 1 日,在沿经纬度的分布上,冰云粒子有效半径存在两个高值区,而冰云粒子数浓度和冰水含量只存在一个高值区,且范围相对较小。这是因为冰云粒子有效半径由环境大尺度决定[32]。结合图 1 可知冰水含量和冰云粒子数浓度高值区对应的正好为暴雨,而冰云粒子有效半径的高值区则对应为大雨和暴雨,且都存在于深对流云内部。显然,38.2 °N ~ 38.9 °N 区域内蒸发量大,蒸发进入大气的水汽相对较多,有利于云中冰水转化。同样,在 2014 年 7 月 4 日和 2015 年 8 月 31 日也有类似的状况。

三次强降水过程中,在沿高度的分布上,冰云粒子有效半径高值区存在于云层中下部,且随高度上升而减小;冰云粒子数浓度高值区存在于云层中上部,且随高度上升而增加;冰水含量高值区则存在于云层中部。这是因为当云顶发展到 0 ℃层以上,云滴处于过冷却状态,一旦过冷却水云区有冰相粒子形成,则由于同温度下水和冰的表面热力性质差异,云的胶体稳定状态被打破,产生从大量云滴到少数冰晶的水汽质量扩散,促使冰晶快速增长[31],而海拔高度越高则温度相对越低,因此冰云粒子数浓度随云层高度增加而增加;大的冰质粒因为有效半径大,下落末速度比较大,因此冰云粒子有效半径随高度增加而减小,而冰质粒碰并增长的过程中冰云粒子数浓度也随之减小;而冰水含量则是冰云粒子有效半径和冰云粒子数浓度共同作用的结果[33]。

2.3.3　*冰云微观物理量的垂直分布与降水强度关系*　为了更直观地表现冰云微观物理量在垂直分布中随降水强度的变化规律,给出了三次强降水过程中冰云微观物理量在纬度上的平均值随高度的变化(图 7)。结合三次强降水的降水强度可以发现,在 9 km 以上,冰云粒子有效半径随降水强度增大而增大;在 9 km 以下,冰云粒子有效半径与降水强度则无明显相关性。在12 km以上,冰云粒子数浓度与

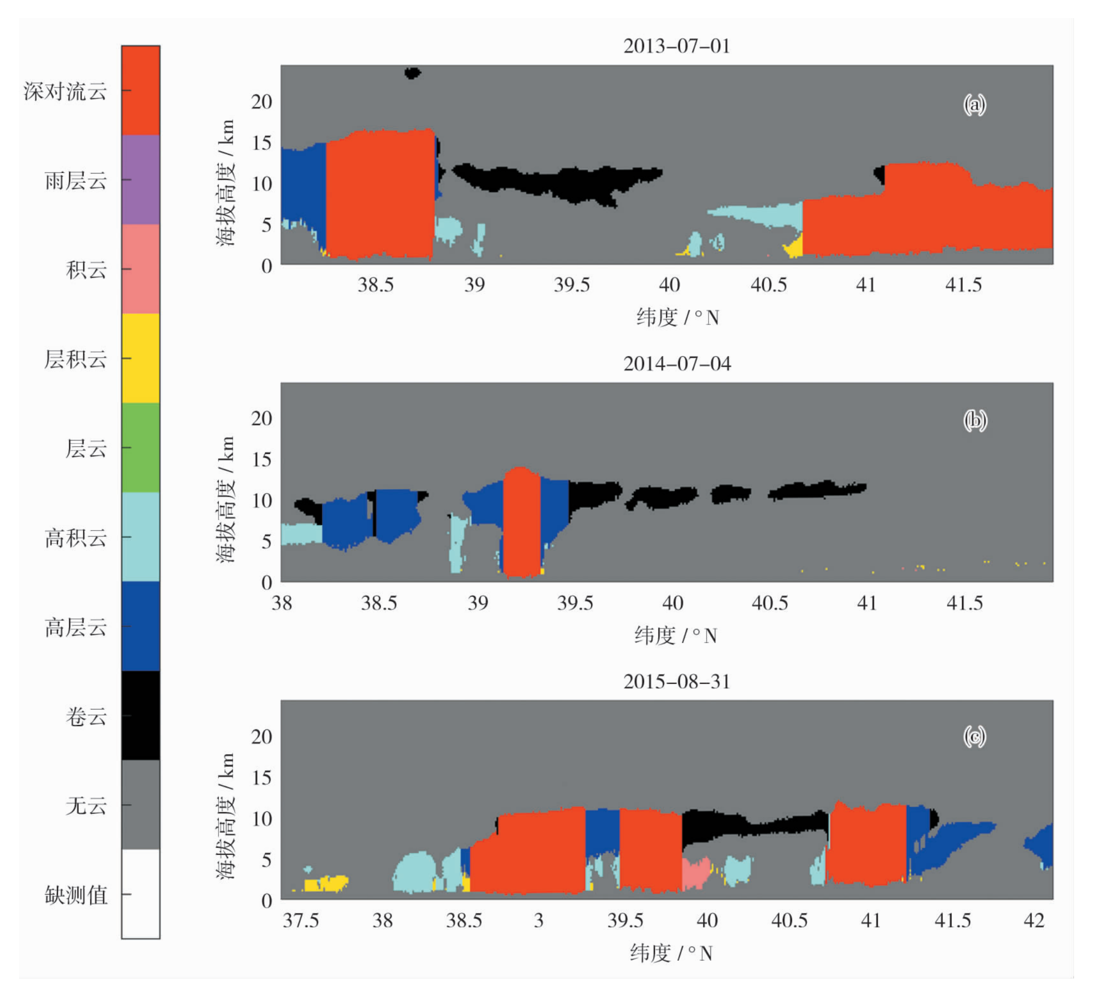


图5 云类型的垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of cloud types

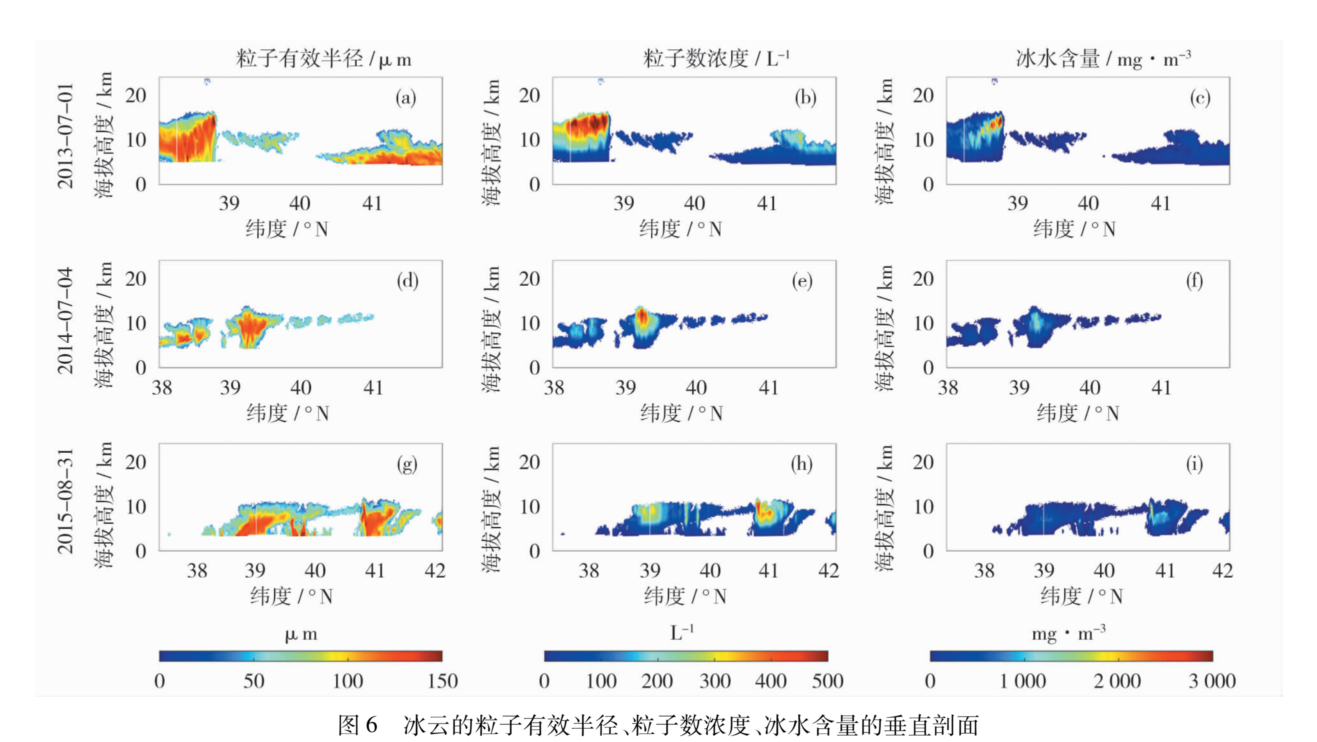


图6 冰云的粒子有效半径、粒子数浓度、冰水含量的垂直剖面

Fig. 6 Vertical profile of particle effective radius, particle number concentration, and ice water content of ice clouds

降水强度随降水强度增大而增大;在 8.5 km 以下,冰云粒子数浓度几乎随降水强度增大而减小;在 8.5~12 km 之间,冰云粒子数浓度与降水强度呈无明显相关性。在 8.5 km 以上,冰水含量随降水强度增大而增大;在 8.5 km 以下,冰水含量几乎随降水强度增大而减小。综上,冰云微观物理量在 9 km 以上随降水强度增大而增大。

2.4 冰云宏微观物理量与降水强度相关性分析

三次强降水过程共得到 11 661 个冰云数据,其中 4 412 个冰云数据对应的降水强度不为 0。所以本文筛选出这一部分冰云数据,分析冰云的 4 种物理量与降水强度的相关性(图 8)。可以看出,这 4 种物理量与降水相关性都通过了显著性检验,其中冰云云顶高度与降水强度为正相关且相关性最高,相关度 R 可达 0.555 4,冰云光学厚度、冰水路径和降水强度也为正相关,相关度 R 分别为 0.390 2 和 0.332 9,而冰云粒子有效半径的负相关度 R 极低,为 -0.085 8。

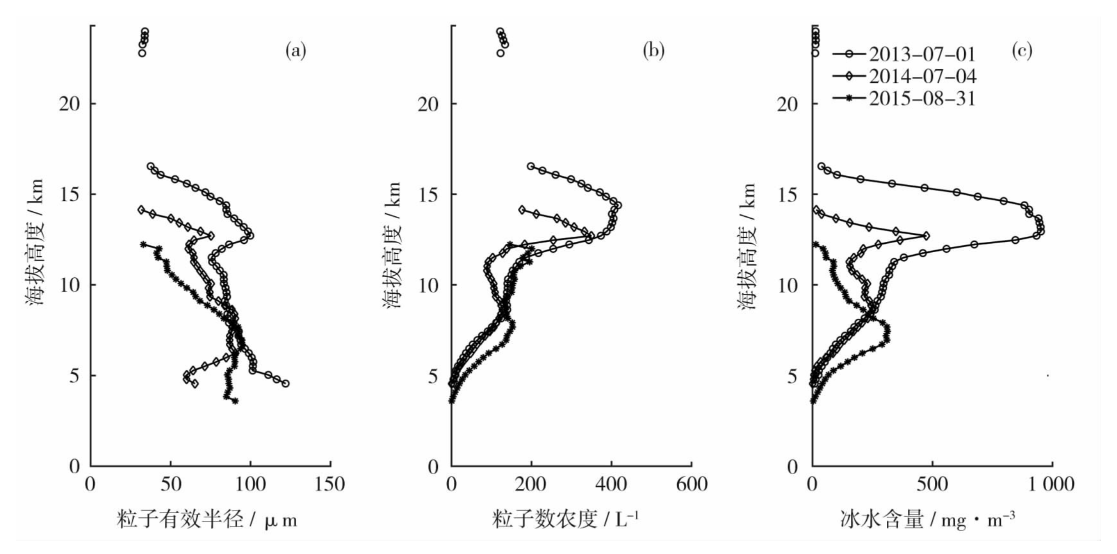


图 7 冰云粒子有效半径、冰云粒子数浓度、冰水含量的平均值的垂直分布

Fig. 7 Vertical distribution of average value of effective particle radius, particle number concentration and ice water content of ice clouds

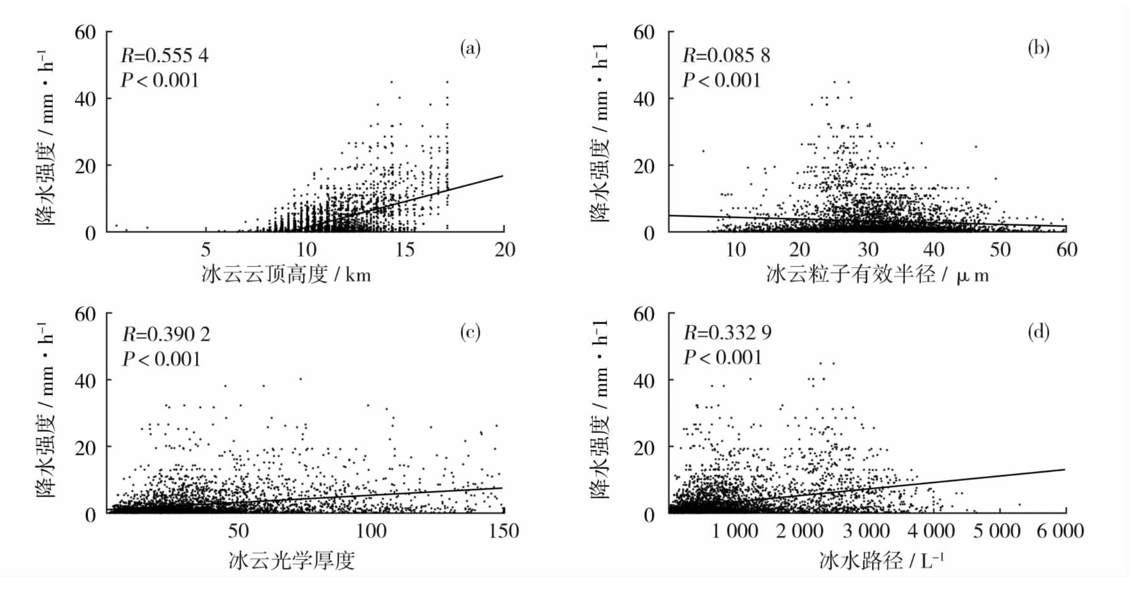


图 8 冰云的云顶高度、粒子有效半径半径、光学厚度、冰水路径与降水强度的相关性

Fig. 8 Cloud top height, particle effective radius, optical thickness, ice water path of ice clouds and precipitation intensity correlation

3 结 论

（1）在水平分布中，强降水过程中降水强度较大的站点，云的颜色较白，色调较亮，云相对较厚。降水强度高值区所对应的云的相态都是冰云，但冰云在整个京津冀地区所占比例随降水强度变化不大。冰云云顶高度在8～17 km，冰云粒子有效半径最高可达60 μm，冰云光学厚度最高可达150，冰水路径最高可达5 000 $g \cdot m^{-2}$。

（2）在垂直分布中，冰云主要分布在3.5 km以上，且冰云的厚度和冰云云顶高度随降水强度增大而增大。强降水过程中冰云的类型主要有深对流云、高层云、卷云、高积云，但发生强降水站点的冰云为深对流云。冰云粒子有效半径最高可达150 μm，冰水含量最高可达3 000 $mg \cdot m^{-3}$，冰云粒子数浓度最高可达500 L^{-1}。冰云粒子有效半径高值区存在于云层中下部，且随高度上升而减小；冰云粒子数浓度高值区存在于云层中上部，且随高度上升而增加；冰水含量高值区则存在于云层中部。

（3）就冰云宏微观物理量与降水强度的关系而言，在水平分布中，冰云云顶高度、冰云光学厚度、冰水路径都随降水强度增大而增大。在垂直分布中，在9 km以上，冰云粒子有效半径随降水强度增大而增大；在9 km以下，冰云粒子有效半径与降水强度则无明显相关性。在12 km以上，冰云粒子数浓度随降水强度增大而增大；在8.5 km以下，冰云粒子数浓度几乎随降水强度增大而减小；在8.5～12 km之间，冰云粒子数浓度与降水强度呈无明显相关性。在8.5 km以上，冰水含量随降水强度增大而增大；在8.5 km以下，冰水含量几乎随降水强度增大而减小。

参考文献(References)

[1] 温煦. 京津冀地区暖季降水特征分析[D]. 兰州：兰州大学，2016. [WEN Xu. Characteristics of warm-season precipitation over Beijing-Tianjin-Hebei[D]. Lanzhou：Lanzhou University，2016.]

[2] 鲍超，贺东梅. 京津冀城市群水资源开发利用的时空特征与政策启示[J]. 地理科学进展，2017，36(1)：58－67. [BAO Chao，HE Dongmei. Spatiotemporal characteristics of water resources exploitation and policy implications in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration[J]. Progress in Geography，2017，36(1)：58－67.]

[3] 孙继松，何娜，王国荣，等."7·21"北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探[J]. 暴雨灾害，2012，31(3)：218－225. [SUN Jisong，HE Na，WANG Guorong，et al. Preliminary analysis on synoptic configuration evolvement and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012[J]. Torrential Rain Disasters，2012，31(3)：218－225.]

[4] 孙建华，赵思雄，傅慎明，等. 2012年7月21日北京特大暴雨的多尺度特征[J]. 大气科学，2013，27(3)：705－718. [SUN Jianhua，ZHAO Sixiong，FU Shenming，et al. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing area on July 21，2012[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences，2013，37(3)：705－718.]

[5] 冉令坤，齐彦斌，郝寿昌，"7·21"暴雨过程动力因子分析和预报研究[J]. 大气科学，2014，38(1)：83－100. [RAN Lingkun，QI Yanbin，HAO Shouchang. Analysis and forecasting of heavy rainfall case on 21 July 2012 with dynamical parameters[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences，2014，38(1)：83－100.]

[6] 王坚红，杨艺亚，苗春生，等. 华南沿海暖区辐合线暴雨地形动力机制数值模拟研究[J]. 大气科学，2017，41(4)：784－796. [WANG Jianhong，YANG Yiya，MIAO Chunsheng，et al. The numerical study of terrain dynamic influence on warm area heavy rainfall of convergence lines in south China coast[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences，2017，41(4)：784－796.]

[7] 齐彦斌，郭学良，金德镇. 一次东北冷涡中对流云带的宏微物理结构探测研究[J]. 大气科学，2007，31(4)：621－634. [QI Yanbin，GUO Xueliang，JIN Dezhen. An observational study of macro/microphysical structures of convective rainbands of a cold vortex over northeast China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences，2007，31(4)：621－634.]

[8] 周毓荃，蔡淼，欧建军，等. 云特征参数与降水相关性的研究[J]. 大气科学学报，2011，34(6)：641－652. [ZHOU Yuquan，CAI Miao，OU Jianjun，et al. Correlation between cloud characteristic parameters and precipitation[J]. Transactions of Atmospheric Sciences，2011，34(6)：641－652.]

[9] 任建奇，严卫，叶晶，等. 云相态的卫星遥感研究进展[J]. 地球科学进展，2010，25(10)：1051－1060. [REN Jianqi，YAN Wei，YE Jing，et al. Advances in the study of cloud phase discrimination using satellite remote sensing data[J]. Advances in Earth Science，2010，25(10)：1051－1060.]

[10] 周晓丽，胡列群，马丽云，等. 基于FY3A资料的天山山区暴雨云相态分析[J]. 干旱区地理，2014，37(4)：667－675. [ZHOU Xiaoli，Hu Liequn，MA Liyun，et al. Storm cloud phase in the Tianshan Mountains areas based on FY3A data[J]. Arid Land Geography，2014，37(4)：667－675.]

[11] 刘健，董超华，朱元竞，等. FY－1C资料在云顶粒子热力学相态分析中的应用研究[J]. 大气科学，2003，27(5)：901－908. [LIU Jian，DONG Chaohua，ZHU Yuanjing，et al. Thermodynamicphase analysis of cloud particles with FY－1C data[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences，2003，27(5)：901－908.]

[12] 周非非，洪延超，赵震. 一次层状云系水分收支和降水机制的数值研究[J]. 气象学报，2010，68(2)：182－194. [ZHOU Feifei，HONG Yanchao，ZHAO Zhen. A numerical study of the moisture budget and the mechanism for precipitation for a stratiform

cloud system[J]. Acta Meteorologica Sinica,2010,68(2):182 - 194.]

[13] 梁军,张胜军,王树雄,等.大连地区一次区域暴雪的特征分析和数值模拟[J].高原气象,2010,29(3):744 - 754.[LIANG Jun,ZHANG Shengjun,WANG Shuxiong,et al. Characteristic analysis and numerical simulation of a snowstorm in Dalian region[J]. Plateau Meteorology,2010,29(3):744 - 754.]

[14] 张苹.云卫星资料在天山山区降雨云研究中的应用[D].上海:东华大学,2012.[ZHANG Ping. Application of CloudSat data in the study of rainfall clouds over Tianshan Mountains[D]. Shanghai:Donghua University,2012.]

[15] 邓军英.云卫星在降水云研究中的应用[D].上海:东华大学,2014.[Deng Junying. Application of CloudSat in the study of precipitation clouds[D]. Shanghai:Donghua University,2014.]

[16] 何金海,郭品文,银燕,等.大气科学概论[M].北京:气象出版社,2012:195 - 214.[HE Jinhai,GUO Pinwen,YIN Yan,et al. Introduction to atmospheric science[M]. Beijing:China Meteorological Press,2012:195 - 214.]

[17] KOTARBA A Z. A comparison of MODIS-derived cloud amount with visual surface observations[J]. Atmospheric Research,2009,92(4):522 - 530.

[18] TANG X,CHEN B. Cloud types associated with the Asian summer monsoons as determined from MODIS/TERRA measurements and a comparison with surface observations[J]. Geophysical Research Letters,2006,33(7):359 - 377.

[19] MEYER K,YANG P,Gao B C. Tropical ice cloud optical depth, ice water path, and frequency fields inferred from the MODIS level - 3 data[J]. Atmospheric Research,2007,85(2):171 - 182.

[20] 杨冰韵,张华,彭杰,等.利用CloudSat卫星资料分析云微物理和光学性质的分布特征[J].高原气象,2014,33(4):1105 - 1118.[YANG Bingyun,ZHANG Hua,PENG Jie,et al. Analysis on global distribution characteristics of cloud microphysical and optical properties based on the CloudSat data[J]. Plateau Meteorology,2014,33(4):1105 - 1118.]

[21] 张华,杨冰韵,彭杰,等.东亚地区云微物理量分布特征的CloudSat卫星观测研究[J].大气科学,2015,39(2):235 - 248.[ZHANG Hua,YANG Bingyun,PENG Jie,et al. The characteristics of cloud microphysical properties in east Asia with the CloudSat dataset[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2015,39 (2):235 - 248.]

[22] GRENIER P,BLANCHET J P,MUNOZ-ALPIZAR R. Study of polar thin ice clouds and aerosols seen by CloudSat and CALIPSO during midwinter 2007[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2009,114(D9).

[23] HAM S H,SOHN B J,KATO S,et al. Vertical structure of ice cloud layers from CloudSat and CALIPSO measurements and comparison to NICAM simulations[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2013,118(17):9930 - 9947.

[24] 赵姝慧.利用TRMM卫星和Cloudsat卫星对不同类型云系的中微尺度结构的研究分析[D].南京:南京信息工程大学,2008.[ZHAO Shuhui. A study on the mesoscale and microscale structures in different types of clouds by TRMM satellite and CloudSat satellite[D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology,2008.]

[25] 陈勇航,邓军英,张萍,等.中天山附近强降雨过程中云冰水含量随高度变化特征[J].资源科学,2013,35(3):655 - 664.[CHEN Yonghang,DENG Junying,ZHANG Ping,et al. Vertical distribution of ice water content in clouds during heavy rains around Tianshan Mountain[J]. Resources Science,2013,35(3):655 - 664.]

[26] 邓军英,丁明月,王文彩,等.冰云粒子微物理属性在一次强降雨过程中的垂直分布[J].干旱区地理,2016,39(3):590 - 599.[DENG Junying,DING Mingyue,WANG Wencai,et al. Vertical distributions microphysical properties of ice particles in a heavy rain[J]. Arid Land Geography,2016,39(1): 590 - 599.]

[27] 王蕾,黄慰军,黄镇,等.新疆两次暴雪过程云系的MODIS三光谱特征分析[J].气象科学,2011,31(1):107 - 112.[WANG Lei,HUANG Weijun,Huang Zhen,et al. Cloud tri-spectral analysis of two snowstorms in Xinjiang Region using MODIS data[J]. Journal of the Meteorological Sciences,2011,31(1):107 - 112.]

[28] 李光伟.基于CPR和MODIS探测结果的云顶温度和云顶高度反演研究[D].合肥:中国科学技术大学,2010.[LI Guangwei. Cloud top temperature and cloud top height inversion based on CPR and MODIS detection results[D]. Hefei:University of Science and Technology of China. 2010.]

[29] 尹金方,王东海,许焕斌,等.冰核对云物理属性和降水影响的研究[J].地球科学进展,2015,30(3):323 - 333.[YIN Jinfang,WANG Donghai,XU Huangbin,et al. A study of the effects of ice nuclei on cloud microphysical properties and precipitation[J]. Advances in Earth Science,2015,30(3):323 - 333.]

[30] 傅云飞,冯静夷,朱红芳,等.西太平洋副热带高压下热对流降水结构特征的个例分析[J].气象学报,2005,63(5):750 - 761.[FU Yunfei,FENG Jingyi,ZHU Hongfang,et al. Structures of a thermal convective precipitation system happened in controlling of the Western Subtropical Pacific High[J]. Acta Meteorologica Sinica,2005,63(5):750 - 761.]

[31] 杨军,陈宝君,银燕.云降水物理学[M].北京:气象出版社,2011:187 - 243.[YANG Jun,CHEN Baojun,YIN Yan. Physics of cloud and precipitation[M]. Beijing:China Meteorological Press,2011:187 - 243.]

[32] 杨大生,王普才.中国地区夏季云粒子尺寸的时空分布特征[J].气候与环境研究,2012,17(4):433 - 443.[YANG Dasheng,WANG Pucai. Tempo-spatial distribution characteristics of cloud particle size over China during summer[J]. Climatic and Environmental Research,2012,17(4):433 - 443.]

[33] 马占山,刘奇俊,秦琰琰,等.云探测卫星CloudSat[J].气象,2008,34(8):104 - 111.[MA Zhanshan,LIU Qijun,QI Yanyan. Introductions to a new type cloud detecting satellite:CloudSat[J]. Meteorological Monthly,2008,34(8):104 - 111.]

Macrophysical and microphysical properties of ice clouds during heavy rainfalls in Beijing-Tianjin-Hebei region in summer

ZHENG Qian[1], ZHENG You-fei[1,2,3], WANG Li-wen[1], LI Te[1], LIN Tong[1], DU Jia-yi[4]

(1 *School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing* 210044, *Jiangsu, China*; 2 *Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing* 210044, *Jiangsu, China*; 3 *Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing* 210044, *Jiangsu, China*; 4 *School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing* 210044, *Jiangsu, China*)

Abstract: Heavy rainfall is one of the main weathers in Beijing-Tianjin-Hebei region in summer. The macrophysical and microphysical properties of ice clouds are of great significance during the process of precipitation. This paper selects three heavy rainfall processes occurred in the Beijing-Tianjin-Hebei region to analyze the horizontal and vertical distribution of macrophysical and microphysical properties of ice clouds and to explore the variation of relationship between these variables and precipitation intensity. The data set in this paper is consist of a merged precipitation product developed by National Meterological Information Center of China, Aqua MODIS level 2 cloud product, CloudSat level 2 product, and MODIS L1B radiance data. The results show that in the horizontal distribution, the clouds with high precipitation intensity during a heavy rainfall are whiter, brighter, and relatively thicker. The cloud phase corresponding to the high precipitation intensity area is ice, but the proportion of ice clouds in the whole Beijing-Tianjin-Hebei region does not change with the precipitation intensity. The ice cloud top height ranges from 8 km to 17 km. The maximum of particle effective radius, optical thickness, and ice water path of ice clouds are up to 60 m, 150, 5 000 $g \cdot m^{-2}$ respectively. The optical thickness, ice water path, cloud top height of ice clouds and precipitation intensity are positively correlated, but the particle effective radius of ice clouds is not correlated with precipitation intensity. In the vertical distribution, the ice clouds are mainly located above 3.5 km, and the high precipitation intensity is consistent with the thickness and cloud top height of ice clouds. The ice clouds at the station of heavy rainfall are deep convective clouds. The maximum of particles effective radius, particle number concentration, and ice water content of ice clouds are up to 150 μm, 500 L^{-1}, 3 000 $mg \cdot m^{-2}$ respectively. The highest particle effective radius of ice clouds is located in the middle and lower layers of the cloud, and is decreased with height. The highest particle number concentration of ice clouds is located in the upper layer of the cloud, and is increased with height. The highest ice water content of ice clouds is located in the middle of the cloud. The particles effective radius, particle number concentration, and ice water content of ice clouds above 9 km are positively correlated with precipitation intensity.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei; summer; ice clouds; heavy rainfall; macrophysical and microphysical properties